



بررسی تجربی تابش گونه‌های احتراقی در تعیین نسبت هم‌ارزی در مشعل شعله سطحی

حسین سلطانیان، محمد ضابطیان طرقي*، هادی پاسدارشهری

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۱-۲۹
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۶-۲۹
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۶-۳۱
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۷-۱۸

کلمات کلیدی:

طیف تابشی
گونه‌های احتراقی
نورتابی شیمیایی
آلاینده
مشعل شعله سطحی

خلاصه: در پژوهش حاضر گونه‌های مهم احتراقی با سنجش تابش مشعل سوراخ‌دار بررسی شده است. تابش بکمک طیف سنجی فیبر نوری روی یک بستر آزمون دارای مشعل با فناوری جدید مورد استفاده در دیگ‌های چگالشی، تحلیل شده است. از نورتابی شیمیایی برای سنجش گونه‌های احتراقی H_2O^* ، CO_2^* ، C_2^* ، CH^* ، OH^* استفاده شده است. به ازای نسبت‌های مختلف هم‌ارزی و در توان‌های ۱۱-۱۶ کیلووات از مشعل، شدت تابش گونه‌ی CO_2^* که نقش مهمی در تعیین نرخ حرارت آزاد شده از شعله دارد، اندازه‌گیری شد که شدت بیشینه در محدوده $0.78 < \Phi < 0.85$ در تمامی مقادیر توان مشعل به دست آمد. همچنین بیشترین شدت تابش رادیکال OH^* که در مراجع بیان‌گر دومین شاخص تعیین‌کننده نرخ حرارت آزاد شده از مشعل است، در محدوده $0.77 < \Phi < 0.85$ در توان‌های کاری مشعل می‌باشد که در تطابق بسیار خوبی با محدوده‌ی بیشینه‌ی CO_2^* است. همچنین بیشترین محدوده دمای شعله در محدوده‌ی $0.78 < \Phi < 0.87$ با استفاده از ترموکوپل اندازه‌گیری شد که با نتایج گونه‌های OH^* و CO_2^* در ارزیابی بیشترین نرخ حرارت آزاد شده از شعله تطابق مناسبی دارد. بعلاوه، نسبت شدت OH^*/CH^* به صورت مستقل از توان مشعل به دست آمد که توسط سایر محققین نیز تأیید شده است. بنابراین می‌توان با سنجش تابش شعله، به نسبت هم‌ارزی آن پی برد.

۱-مقدمه

در آن‌ها حسگر اندازه‌گیری، به طور مستقیم در منطقه‌ی اندازه‌گیری مورد نظر قرار می‌گیرد. بارزترین ویژگی نامطلوب حسگرهای اندازه‌گیری تداخلی که تعامل ناخواسته با سیستم اندازه‌گیری در محل اندازه‌گیری است، غیرقابل اجتناب می‌باشد [۲]. تداخل موضعی به وجود آمده منجر به واکنش‌های ناخواسته در شعله، تغییر در شکل آن و همچنین تغییر در کمیات ترموفیزیکی نظیر دما و غلظت گونه‌ها می‌شود [۳]. طیف‌سنجی تابش شعله^۱، اساس بسیاری از روش‌های غیر تداخلی است. ظهور طیف‌سنج‌های جدید با تجهیزات آشکارساز سیگنال داخلی در دهه‌های اخیر، محققین را بر آن داشته است تا این فناوری را برای نظارت بر عملکرد احتراق شعله‌های مقیاس کوچک و نیز شعله‌های صنعتی با مقیاس بزرگ به کار گیرند [۴].

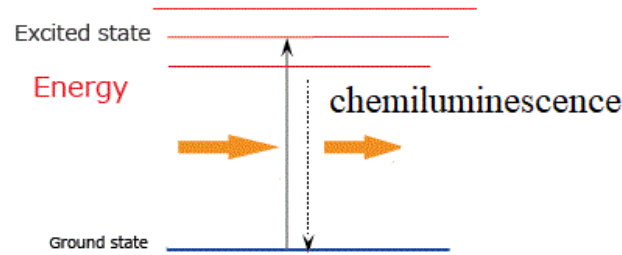
بررسی تابش صادر شده از شعله که به صورت طبیعی و یا حاصل از تحریک آن به کمک یک منبع انرژی خارجی (لیزر) انجام می‌شود و همچنین نور جذب شده به وسیله شعله، پایه‌ی بسیاری از روش‌های اندازه‌گیری دما و غلظت گونه‌ها در علم احتراق است که در تعیین دامنه‌ی وسیعی از پارامترهای عملکردی سامانه‌های احتراقی، با حد تفکیک مناسب قابل انجام است [۱]. به همین جهت، روش‌های تجربی گوناگونی برای شناسایی و تشخیص گونه‌ها، از جمله روش‌های تداخلی^۱ و غیر تداخلی^۲ مورد استفاده قرار می‌گیرد. در اندازه‌گیری‌های احتراق، روش‌های تداخلی به گروهی از روش‌ها اطلاق می‌شود که

- 1 Intrusive methods
- 2 Non-intrusive methods

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: zabetian@modares.ac.ir

3 Flame emission spectroscopy





شکل ۱. صادر کردن نور در اثر پدیده‌ی نورتابی شیمیایی
Fig. 1. Emission from chemiluminescence

تابش حرارتی (که عمدتاً در محدوده مادون قرمز اتفاق می افتد) می باشد. این روش به عنوان جایگزینی مناسب در اندازه گیری های مربوط به احتراق نسبت به روش های پیشین، شناخته می شود و به علت سادگی پیاده سازی بستر آزمون و ماهیت نوری غیر فعال آن (که مزیت عدم ایجاد اثرات جانبی بر شعله توسط انرژی جذب شده از احتراق را دارد)، در مقایسه با اندازه گیری به کمک لیزر، برای کاربردهای تجربی مناسب است [۴]. در دو دهه ی اخیر، دسترسی به طیف سنج های فیبر نوری قابل حمل^۶، این روش را به یک روش مناسب برای مطالعات آزمایشگاهی و همچنین مشعل های بزرگ مقیاس صنعتی تبدیل کرده است.

در حالت کلی، منابع اصلی تابش شعله ذرات دوده (منجر به تابش به صورت جسم سیاه)، مولکول های گاز در دمای بالا و واکنش های شیمیایی که مستقیماً منجر به تولید گونه های برانگیخته ی نورتاب می شوند، می باشد. طول موج تابش این گونه های نورتاب وابسته به نوع گونه ی برانگیخته ی تولید شده از واکنش و همچنین تغییر تراز الکترونی آن در رسیدن به حالت پایدار است که منجر به تابش طول موج مشخصی از آن گونه شده و آن گونه را از سایرین متمایز می سازد. نور تابیده شده به طور مستقیم هم جهت با تغییرات غلظت رادیکال های برانگیخته است که یکی از نتایج نرخ تشکیل و نابودی آنهاست [۷]. شکل ۱ طرحی از نور تابیده شده در اثر بازگشت گونه ی نورتاب از حالت برانگیخته به حالت پایدار را نشان می دهد.

در بخش تشخیص گونه ها، بانک داده های طیفی مربوط به طیف های تابشی گونه ها موجود است که با استفاده از آن ها، تشخیص گونه ها انجام می شود. به طور کلی طیف های تابشی، به دو شکل طیف تابش گرمایی (ناشی از تشعشع برانگیختگی^۷ به علت دمای

مشخصه هایی که عملکرد مشعل با استفاده از آن ها مورد ارزیابی قرار می گیرد، شامل توزیع دمای مناسب در سراسر مشعل، غلظت مناسب رادیکال ها و گونه های مهم که در آزادسازی حرارت مؤثرند، کم بودن غلظت آلاینده ها، پایداری شعله از نظر نوسانات زمانی شدت نور آن، توان حرارتی تولیدی منطبق با طراحی در تنظیم نسبت هوا و سوخت، بالا بودن سهم تشعشع نسبت به جابجایی در انتقال گرمای کلی و پایداری کلی از نظر وجود احتراق در سراسر مشعل بدون برخاستگی^۱ شعله و پس زنی^۲ آن است [۵]. در مقاله ی اخیر، تمرکز روی بررسی میزان حضور گونه های مهم احتراقی و بررسی نسبت سوخت به هوا با هدف دستیابی به نسبت هم آرزوی مناسب جهت بهینه بودن نرخ حرارت آزاد شده از احتراق است.

اندازه گیری های غیرتداخلی، شامل روش های غیرفعال^۳ (غیر لیزری) و فعال^۴ (لیزری) است. در این دسته بندی، روش های لیزری با وجود قابلیت اندازه گیری دقیق و کاملاً هدفمند، نیازمند تجهیزات گران قیمت (مانند لیزر، دوربین های با سرعت بالا، عدسی ها، فیلترها و نظایر آن) بوده و پیچیدگی اجزاء زیادی دارند. طیف سنجی تابشی شعله^۵ یک روش غیرفعال حساس به اغتشاشات خارجی است که براساس دریافت تابش از شعله، در یک منطقه طیف گسترده از آن عمل می کند. از جمله مزیت های این روش، کم هزینه بودن، سادگی کاربرد و مقاومت در برابر اغتشاشات محیطی (بر خلاف روش لیزری که نیازمند تنظیم دقیق و بسیار حساس است) می باشد [۶].

روش طیف سنجی تابشی شعله که بر اساس مشخصات نوری فرآیند احتراق است، شامل دو نوع تحلیل نورتابی شیمیایی و تحلیل

- 1 Lift off
- 2 Flash back
- 3 Passive
- 4 Active
- 5 Flame Emission Spectroscopy (FES)

6 Portable fiber optic spectrometer
 7 Excitement

شعله‌ی پیش‌آمیخته‌ی گاز طبیعی با نسبت هم‌ارزی ۰/۷ الی ۱/۳ را مورد بررسی قرار دادند. در کار صورت گرفته، تابش OH^* ، CH^* و تابش پس‌زمینه CO_2^* به عنوان یک شاخص مناسب جهت بررسی میزان حرارت آزاد شده به دست آمد. طیف تابشی فرآورده‌های احتراق در محدوده‌ی ۳۵۰ تا ۶۰۰ نانومتر شامل پس‌زمینه‌ی CO_2^* است که بر روی آن تابش محلی گونه‌های OH^* ، CH^* و C_2^* سوار شده‌اند. همچنین آن‌ها به رابطه‌ی مستقیم میان نسبت تابش OH^*/CH^* و نسبت هم‌ارزی اشاره کردند.

پاناتسوس و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۰ نورتابی شیمیایی گونه‌های OH^* ، CH^* و C_2^* در شعله‌ی پروپان و دیگر سوخت‌ها نظیر ایزواکتان، اتانول و متانول را برای نسبت‌های مختلف هم‌ارزی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که با کاهش نسبت هم‌ارزی، نسبت تابش OH^*/CH^* نیز کاهش می‌یابد. همچنین گونه‌ی C_2^* به عنوان نمایانگر نرخ آزادسازی حرارت در احتراق سوخت پروپان معرفی شد. در سال ۲۰۱۴ پارامسوارام و همکاران [۱۴] با استفاده از طیف تابش شعله، دمای شعله را اندازه‌گیری کردند. نتایج به دست آمده از محاسبه‌ی دما با استفاده از طیف تابشی، تطابق مناسبی با دمای به دست آمده از ترموکوپل مرجع داشت. همچنین قابلیت اندازه‌گیری دماهای بالای احتراقی به عنوان یکی از مزایای روش استخراج دما با استفاده از طیف تابشی عنوان شد. دپالو و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۶ با استفاده از طیف‌سنجی تابش شعله به تعیین عدد اکتان در بنزین پرداختند. آن‌ها به دلیل سادگی، سریع و کم هزینه بودن این روش، آن را جایگزین مناسبی برای روش استاندارد مورد استفاده در کنترل کیفیت بنزین خودرو عنوان کردند. ژائو [۱۶] طیف‌سنجی را در مشعل‌های حاوی جریان بخار و هوا انجام دادند. نتیجه‌ی دیگر این مقاله آن است که گونه‌ی C_2^* با افزایش مشعل کاهش می‌یابد. نتیجه‌ی دیگر این مقاله آن است که با افزایش فاصله از سرمشعل، نسبت شدت‌های OH^*/CH^* و OH^*/C_2^* افزایش و C_2^*/CH^* کاهش می‌یابد و می‌توان تابش گونه‌ی اصلی CO_2^* را مرتبط با نورتابی شیمیایی در محدوده‌ی وسیعی از طول موج دانست [۱۰]. همچنین رومرو و همکاران به بررسی میزان NO تولیدی و ارتباط آن با تابش OH^* در کوره پرداختند و تغییر هم‌زمان این دو را در نتایج خود عنوان کردند [۱۷].

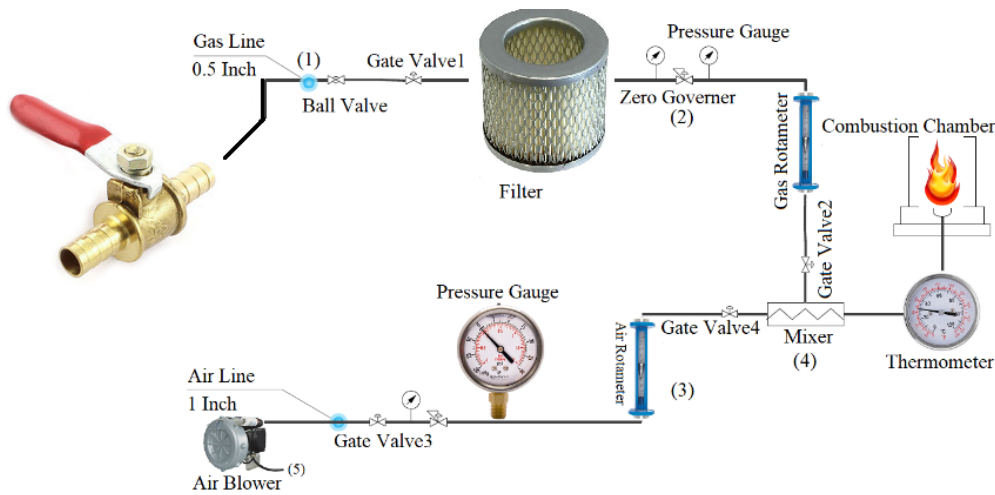
گونه‌های احتراقی مهم، نقشی اساسی در واکنش‌های زنجیره‌ای

بالای گونه‌ها) و طیف تابشی نورتابی شیمیایی^۱ گونه‌ها^۲ (ناشی از برانگیختگی گونه‌ها به علت شرکت آن‌ها در واکنش‌های شیمیایی) تقسیم می‌شوند. در این مقاله طیف ناشی از نورتابی شیمیایی مد نظر است.

گونه‌ی CO_2^* برخلاف سایر گونه‌های احتراقی نورتاب (OH^* ، CH^* ، C_2^* و H_2O^*)، دارای طول موج متناظر با بیشینه‌ی نمودار طیف حاصله نبوده و محدوده‌ای از طول موج‌ها بین ۳۵۰ تا ۶۰۰ نانومتر را در بر می‌گیرد. تابش این گونه به صورت پس‌زمینه‌ای در طیف به دست آمده است که سایر بیشینه‌های نمودار روی آن قرار می‌گیرند. برای به دست آوردن میزان تابش آن باید از نمودار شدت-طول موج در بازه‌ی مذکور انتگرال گرفته شود و این مقدار متناظر با شدت آن خواهد بود. همچنین دو گونه‌ی H_2O^* و CO_2^* دارای بخش مهمی از طول موج در منطقه‌ی مادون قرمز می‌باشند که هر یک از آن‌ها نیز می‌تواند مورد تحلیل قرار گیرد اما در بخش ۲۰۰ تا ۱۲۰۰ نانومتر این دو گونه در کنار سایر گونه‌ها تحلیل دقیق‌تری را به دست می‌دهد که در بخش مرور ادبیات نیز به آن اشاره شده است. از اوایل دهه‌ی ۹۰ میلادی پژوهش‌ها با استفاده از تحلیل طیف تابشی احتراق در حال پیگیری است. رائو و همکاران با پیگیری ردپای NO در تابش طبیعی احتراقی در شعله‌های پروپان و اتیلن ارتباط لگاریتمی بین مقدار NO و تابش مجموع OH^* و CH^* به دست آوردند، همچنین هراندز و همکاران تابش رادیکال‌های مذکور را با پایداری شعله بررسی کردند [۸ و ۹]. سامانیگو و همکاران [۱۰] در سال ۱۹۹۵ به بررسی تابش CO_2^* را در شعله‌های آرام و درهم را به شکل عددی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بین تابش CO_2^* و غلظت اتم‌های H رابطه‌ای به دست آوردند که از تعادل میان گونه‌های O ، CO و H به وجود آمده است و افزایش تابش CO_2^* را نشان‌دهنده‌ای از افزایش تزریق سوخت و تولید حرارت دانستند. در سال ۲۰۰۰، کوچیما و همکاران [۱۱] به بررسی تابش OH^* ، CH^* و C_2^* در شعله پیش‌آمیخته‌ی متان در هوا در نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۹ الی ۱/۵ پرداختند. یافته‌ی آن‌ها رابطه‌ای میان شدت تابش OH^*/CH^* ، OH^*/C_2^* و C_2^*/OH^* با نسبت هم‌ارزی، در ناحیه واکنش بود. در سال ۲۰۰۴، هاردالوپاس و اورین [۱۲] تابش گونه‌های رادیکالی آزاد و طیف پیوسته CO_2^* در

1 Chemiluminescence

2 Species



شکل ۲. نقشه‌ی مسیر هوا و سوخت به همراه تجهیزات کنترلی و اندازه‌گیری

Fig. 2. Plan of air and gas lines with measurement and control instruments

سوخت و هوا استفاده شده است. شیرهای دروازه‌ای^۵ به کار رفته جهت تنظیم دبی سوخت و هوا مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

مسیرهای دوگانه‌ی هوا و سوخت در شکل ۲ مشخص است که مشخصات دقیق لوله‌کشی خطوط گاز و هوا را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، گاز طبیعی از یک خط گاز (۱) با فشار نسبی ۹/۶۵ کیلو پاسکال به مخلوط‌کننده (۴) از طریق یک تنظیم‌کننده (۲) که فشار را تنظیم می‌کند، وارد می‌شود. دبی جریان سوخت قبل از ورود به مخلوط‌کننده با یک روتامتر (۳) اندازه‌گیری می‌شود. جریان هوا توسط دمنده (۵) به مخلوط‌کننده با تنظیم‌کننده در مسیر خود و یک روتامتر^۶ برای اندازه‌گیری جریان آن دمیده می‌شود.

روند کلی انجام آزمون به این صورت است که در ابتدا خط گاز و هوا با فشارهای نسبی به ترتیب ۱۶ و ۴۰ میلی‌بار راه‌اندازی شده و با توجه به شکل ۲ به مخلوط‌کننده و پس از آن به سرمشعل می‌رسند. ابتدا مقدار دبی حجمی سوخت را تنظیم کرده (معرف توان مشعل) و مقدار دبی هوای ورودی تغییر داده می‌شود. نسبت هم‌ارزی از روی دبی‌های تنظیم شده و ارزش حرارتی سوخت به دست می‌آید. فیبر نوری با استفاده از یک نگه‌دارنده در فاصله ۵۰ سانتی‌متری مقابل شعله و عمود بر مرکز هندسی سرمشعل، به منظور دریافت تابش آن نصب شده است. زاویه‌ی واگرایی فیبر معادل $\sin\alpha=0/37$ رادیان بوده به طوری که کل تابش مشعل را دریافت می‌کند. فیبر (با قطر ۴۰۰ میکرون)، تابش دریافتی را به طیف‌سنج می‌فرستد. شکل ۳ به

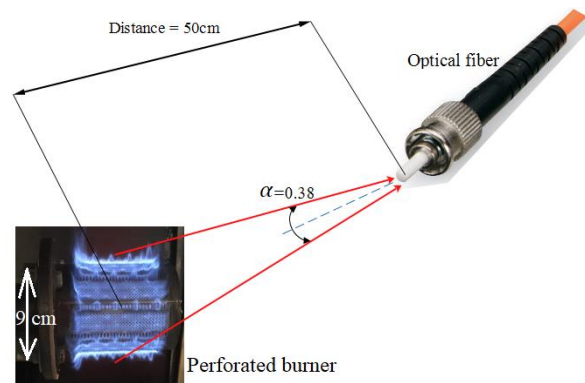
احتراق داشته و می‌توانند جهت بررسی شاخص‌های عملکردی احتراقی مورد استفاده قرار گیرند. بر همین اساس، در این پژوهش با استفاده از طیف‌سنجی تابش شعله، این گونه‌ها در ابتدا روی مشعل سوراخ‌دار^۱ تشخیص داده شده و کارایی آن در تعیین نرخ حرارت آزاد شده از شعله (از روی فرآورده‌ی CO_2^* و OH^*) و دمای سطح مشعل نشان داده شده است. در ادامه دستگاه آزمون معرفی شده و تجهیزات به کار رفته در آن تشریح می‌شوند.

۲- معرفی بستر آزمون و تجهیزات آزمایشگاهی

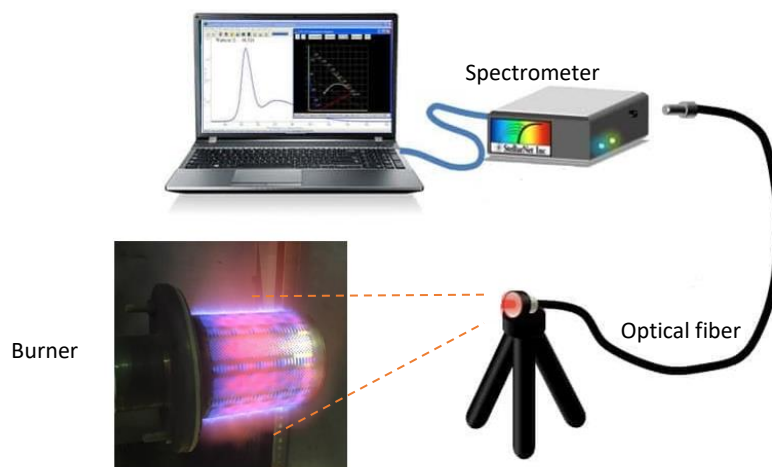
یک مشعل سوراخ‌دار که به طور گسترده‌ای در صنایع احتراق (دیگ‌های چگالشی) استفاده می‌شود، در این مطالعه استفاده شده است. نصب و راه‌اندازی شامل موارد زیر است: یک دمنده‌ی^۲ یک طرفه^۳ با قدرت ۰/۷۵ کیلووات و سرعت زاویه‌ای ۲۸۳۰ دور بر دقیقه، یک مشعل با ظرفیتی در محدوده‌ی ۳۰-۱۰ کیلووات و شکل استوانه‌ای با قطر ۷ سانتی‌متر و طول ۱۰ سانتی‌متر، طیف‌سنج، شیر کنترل دبی، تنظیم‌کننده‌ی فشار، روتامتر هوا و دماسنج دو فلزی که دارای دقت یک درجه سلسیوس و محدوده ۰-۶۰ درجه سلسیوس است. فشارسنج دارای دقت یک میلی‌بار و محدوده‌ی اندازه‌گیری ۰-۴۰ میلی‌بار است و یک مخلوط‌کننده‌ی از نوع ونتوری^۴، جهت اختلاط

- 1 Perforated burner
- 2 Blower
- 3 Side-channel blower
- 4 Venturi mixer

- 5 Gate valve
- 6 Rotameter



شکل ۳. طرح‌واره قرار گیری فیبر نوری نسبت به سرمشعل
Fig. 3. Schematic of optical fiber positioning with burner



شکل ۴. شماتیک بخش نوری تجهیزات چینش آزمون
Fig. 4. Schematic of optical part of test rig

داده شده است.

توان نامی مشعل ۲۶ kW می‌باشد. در جدول ۱ تجهیزات اندازه‌گیری به همراه محدوده‌های آن‌ها به صورت مختصر ارائه شده است.

شکل ۵ نمایی کلی از دستگاه آزمون ساخته شده مربوط به سرمشعل سوراخ‌دار را نشان می‌دهد. قسمت‌های مختلف دستگاه که پیش‌تر معرفی شده بودند در شکل مشخص است.

در جدول ۲ مشخصات فنی طیف‌سنج مورد استفاده، ارائه شده است. حسگر آشکارساز مورد استفاده در طیف‌سنج از مدل TCD\۳۰۴AP متعلق به شرکت توشیبا^۱ است. از ورود نورهای مزاحم اطراف به کمک صفحه‌ی مشکی نسوز قرار گرفته در پشت مشعل و همچنین کم کردن نویز پس زمینه در طیف‌سنج جلوگیری شده است. زمان نوردهی روی

صورت کلی فاصله و زاویه را نسبت به سرمشعل نمایش می‌دهد.

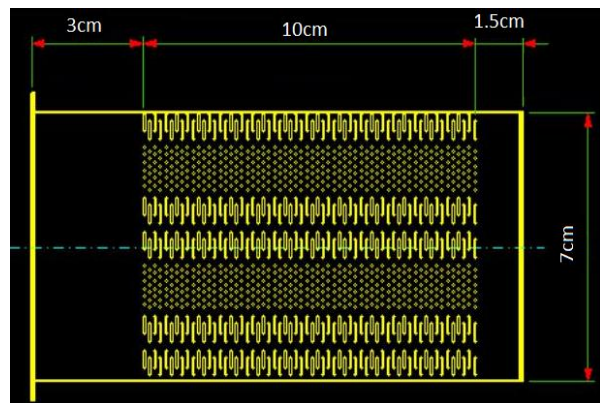
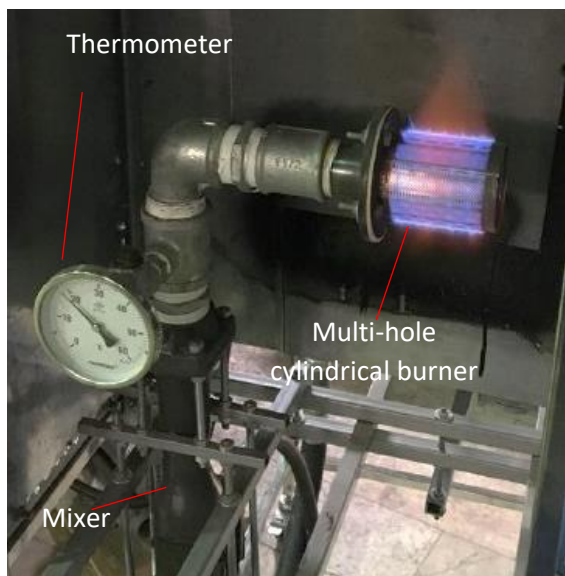
طیف‌سنج به یک رایانه مجهز است که نمودار شدت بر حسب طول موج را با یک نرم‌افزار نصب‌شده بر روی آن فراهم می‌کند. از یک ورق نسوز با رنگ سیاه به منظور کم کردن نور پس‌زمینه و همچنین ورق گالوانیزه پیرامون کل مشعل، جهت جلوگیری از اغتشاش شعله به علت عوامل محیطی مانند باد و همچنین کمینه‌سازی نورهای محیطی وارد شده به بستر آزمون، استفاده شده است. داده‌های حاصل از طیف‌سنج، به ازای هر آزمایش، ده مرتبه و در لحظه‌های با فاصله‌ی مساوی یک ثانیه، ثبت شده و میانگینی از آن‌ها برای هر تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گرفته است که طی آن تکرارپذیری آزمایش‌ها نیز به ازای ده بار داده‌برداری در فاصله زمانی ۱ ثانیه انجام شده است. در این حالت بیشینه مقدار عدم قطعیت شدت دریافتی ۰.۹٪ بوده است. در شکل ۴ طرح‌واره‌ای از جانمایی اجزاء مختلف چینش آزمون نمایش

1 Toshiba

جدول ۱. محدوده و دقت تجهیزات اندازه‌گیری

Table 1. Range and accuracy of measurement instruments

دقت	محدوده‌ی کاری	تجهیز
۱-۶۰ °C	۱ °C	دماسنج خط هوا
۱-۴۵ m ^۳ /h	۱ m ^۳ /h	دبی‌سنج هوا
۰-۶۰ °C	۱ °C	دماسنج خط گاز
۰ m ^۳ /h / ۰.۵	۰ m ^۳ /h / ۰.۰۵	دبی‌سنج گاز
۰-۱۰۰ mbar	۱ mbar	فشارسنج خط هوا و گاز



شکل ۵. دستگاه آزمون طراحی و ساخته شده، مربوط به مشعل سوراخ‌دار پیش‌آمیخته

Fig. 5. The designed and fabricated setup pertaining to premixed perforated burner

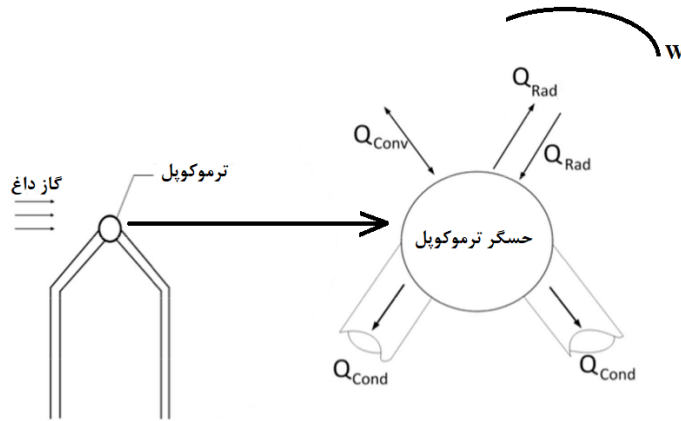
جدول ۲. محدوده و دقت اندازه‌گیری طیف‌سنج

Table 2. Range and accuracy of spectrometer

اندازه / محدوده	ویژگی
۲۰۰-۱۱۰۰ nm	محدوده‌ی طول موج
۱/۸ nm	تفکیک‌پذیری
۳۶۴۸	تعداد پیکسل
۸۰۰:۱	نسبت سیگنال به نویز
۱۰ μs - ۶۰ s	محدوده‌ی زمان پرتوگیری

آمده‌اند. مقادیر محاسبه شده‌ی نسبت‌های هم‌ارزی برای گاز طبیعی، با درصد گازهای ۸۷/۷٪ متان، ۴/۷٪ اتان، ۱/۷۴٪ پروپان و ۵/۸۶٪ ترکیب سایر گازها، انجام شده است. این درصد گازها و شرایط محیطی مربوط به ماه پایانی تابستان است. همچنین کلیه‌ی نتایج با سه بار تکرار

۱۰ ms تنظیم شده و برای افزایش نسبت سیگنال به نویز انجام شده است. در نرم‌افزار طیف‌سنج از میانگین‌گیری جهت به دست آوردن طیف‌های به دست آمده حاصل شده است. داده‌های آزمایش‌ها در دمای محیط ۲۵ درجه‌ی سلسیوس و فشار محیط ۸۸/۵ کیلوپاسکال به دست



شکل ۶. انتقال حرارت از قسمت حسگر ترموکوپل، جهت محاسبه‌ی تصحیح خطای دمای آزمایش
 Fig. 6. Heat transfer from thermocouple bead to assess measured temperature error

مختلف انتقال حرارت در سر ترموکوپل را نشان می‌دهد که در آن هر سه حالت انتقال حرارت تابشی، هدایت و جابجایی در نظر گرفته شده است.

رابطه‌ی (۱) که مربوط به بقای انرژی برای سامانه‌ی در نظر گرفته شده از سر ترموکوپل می‌باشد را در نظر گرفته و از روی آن دمای تصحیح شده‌ی گازهای احتراقی در تماس با ترموکوپل مطابق رابطه‌ی (۳) به دست خواهد آمد.

$$\dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{cond} = 0 \quad (1)$$

$$h(T_g - T_b) + \varepsilon\sigma(T_b^4 - T_w^4) + \left(\frac{kA}{LA_{sur}}\right)\Delta T = 0 \quad (2)$$

$$T_g = T_b + \frac{\varepsilon\sigma(T_b^4 - T_w^4) + \left(\frac{kA}{LA_{sur}}\right)\Delta T}{h} \cong T_b + \frac{\varepsilon\sigma(T_b^4 - T_w^4)}{h} \quad (3)$$

که در آن T_g ، T_b ، T_w ، K_b ، L ، A ، ε و Q به ترتیب دمای گازهای احتراقی، دمای سر ترموکوپل، دمای دیواره‌ی مجاور به مشعل، ضریب رسانش سیم ترموکوپل، مساحت مقطع ترموکوپل، ضریب صدور سر ترموکوپل و گرمای منتقل شده می‌باشند.

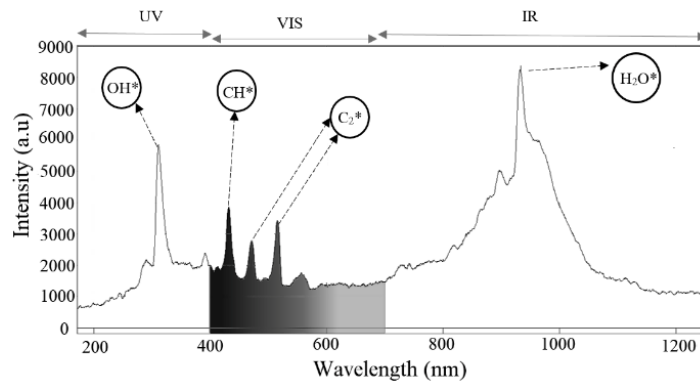
۴- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا نمونه‌ای از طیف دریافتی از شعله، مستخرج از طیف‌سنج ارائه شده و پس از آن شدت گونه‌های احتراقی و نسبت

آزمون در هر مورد به دست آمده است که میانگین نتایج آورده شده است. به منظور اطمینان از محدوده‌ی مناسب نرخ حرارت آزاد شده از مشعل، دمای مشعل را با استفاده از ترموکوپل نوع S اندازه‌گیری شده و در بخش نتایج آورده شده است. با توجه به این که در دماهای احتراقی، دمای گزارش شده از ترموکوپل نیازمند تصحیح است (تصحیح ترموکوپل به واسطه‌ی تابش سطح کروی حسگر ترموکوپل به محیط اطراف)، در ادامه روش تصحیح که در حصول نتایج دما لحاظ شده است، آورده شده است.

۳- تصحیح دمای ترموکوپل

دمای ترموکوپل که در داخل گازهای احتراقی شعله خوانده می‌شود، نشان دهنده‌ی دمای واقعی شعله نبوده و باید تصحیحاتی روی آن انجام شود. علت این امر آن است که ترموکوپل دمای گوی انتهایی خود (محل برخورد دو سیم با جنس‌های مختلف) را نشان می‌دهد و این در حالی است که مقداری از این دما به واسطه‌ی اختلاف دمای آن بخش با محیط اطراف از طریق تابش و یا جابجایی و حتی هدایت حرارت از دست رفته یا به دست می‌آید. با توجه به روابط (۱) تا (۳) و با در نظر گرفتن این نکته که دمای شعله بالا بوده و تشعشع سهم زیادی را ایفا می‌کند، از این بخش از حرارت که بسته به دمای اطراف از دست رفته یا به دست می‌آید، نباید صرف نظر نمود. اما هدایت حرارتی که از سیم‌های ترموکوپل منتقل می‌شوند سهم عمده‌ای نداشته و نسبتاً قابل اغماض می‌باشند. انتقال حرارت جابجایی نیز در بین این دو قرار می‌گیرد [۹]. شکل ۶ حالت‌های



شکل ۷. نمودار طیف تابشی شعله‌ی پیش‌آمیخته‌ی مشعل سوراخ‌دار که شدت نور تابشی شعله را بر حسب طول موج در نسبت هم‌ارزی $\Phi = 1/00$ و ظرفیت مشعل $P = 11/74 \text{ kW}$ را نشان می‌دهد.

Fig. 7. Emission spectrum of perforated burner in equivalence ratio of $\Phi=1.00$ and power of $P=11.74 \text{ kW}$

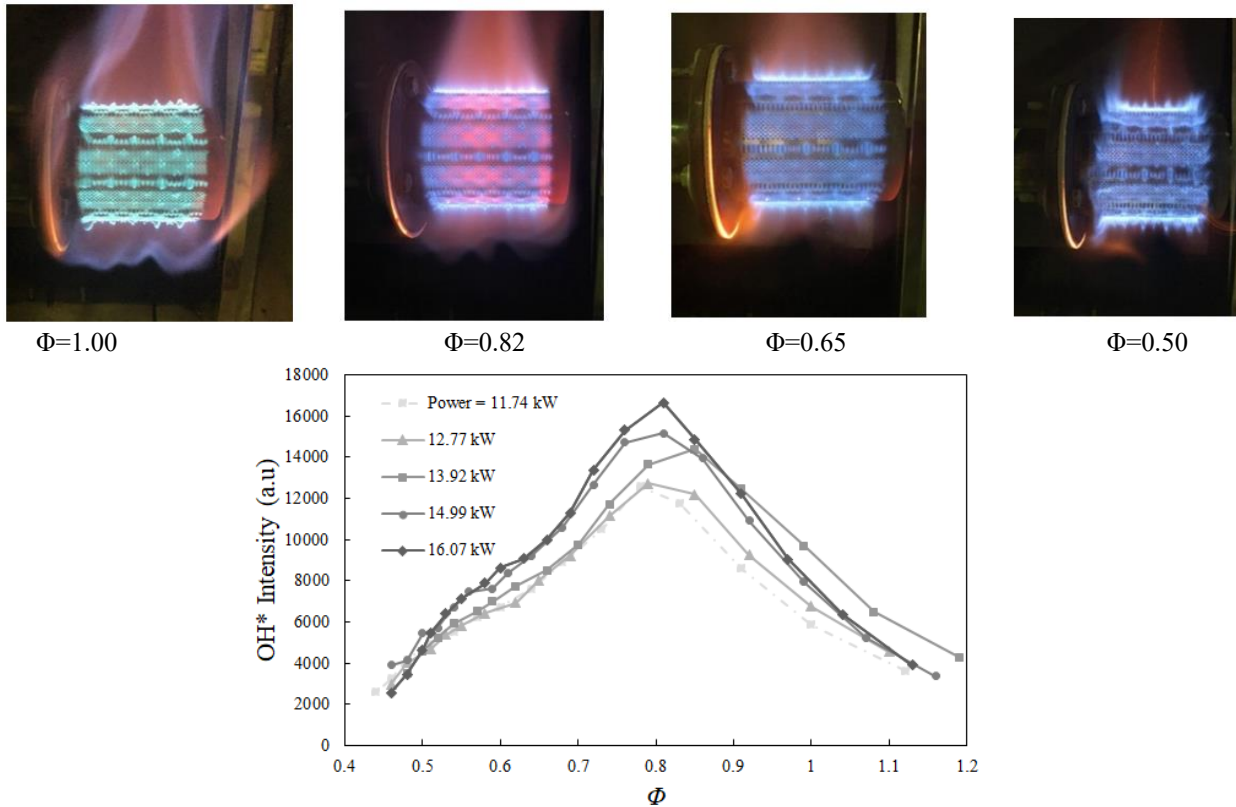
تولید زیاد این گونه تعیین کننده‌ی آن است که شعله حاصل شده پایدارتر خواهد بود [۱۹]. همان‌طور که در شکل ۸ ملاحظه می‌شود، با افزایش نسبت هم‌ارزی، شدت گونه‌ی OH^* در مقادیر نسبتاً رقیق‌سوز (برای تمامی ظرفیت‌های مشعل)، بیشینه است که در محدوده‌ی نسبت هم‌ارزی $0/77-0/85$ قرار می‌گیرد. همچنین با افزایش ظرفیت مشعل، مقدار تابش OH^* برای تمامی حالات، روند افزایشی را نشان می‌دهد که میزان 45% افزایش از کمترین تا بیشترین ظرفیت (در نسبت هم‌ارزی $0/8$) می‌باشد و این امر حاکی از بالاتر بودن نرخ حرارت آزاد شده از شعله است که به واسطه‌ی افزایش مقدار سوخت، حاصل می‌شود. بالا بودن شدت گونه‌ی OH^* ، بهبود تداوم و ثبات فرآیند احتراق را به دنبال خواهد داشت. حد پایین نسبت هم‌ارزی ($\Phi = 0/45$) نیز حالتی است که در آن شعله در مرز خاموشی (حد پایین اشتعال) قرار می‌گیرد.

شکل ۹ تغییرات شدت گونه‌ی فرآورده CO_2^* را نشان می‌دهد. بیشیه مقدار تولید این گونه معرف کامل‌تر بودن فرآیند احتراق بوده و همان‌طور که در مرور ادبیات عنوان شد این بیشینه، بیان‌گر حداکثر نرخ حرارت آزاد شده از مشعل نیز می‌باشد که به واسطه‌ی بالاتر رفتن دمای شعله صورت پذیرفته است. بدین ترتیب بالاترین نرخ حرارت آزاد شده در احتراق صورت گرفته در مشعل، در محدوده‌ی $0/78 < \Phi < 0/85$ مربوط به توان‌های مختلف مشعل واقع شده است. مشخصاً می‌توان این محدوده را مشابه محدوده‌ی نسبت هم‌ارزی

شدت OH^*/CH^* آورده شده است. در شکل ۷ طیف تابشی مربوط به مشعل سوراخ‌دار که در حالت پیش‌آمیخته بوده برای نسبت هم‌ارزی یک (دبی گاز $1/13 \text{ m}^3/\text{hr}$ و دبی هوای $10/53 \text{ m}^3/\text{hr}$) ارائه شده است. بیشینه‌های نمودار مربوط به گونه‌های اصلی نورتاب^۱ شیمیایی در شعله می‌باشد که شامل OH^* ، CH^* ، C_2^* و H_2O^* است. تابش این گونه‌ها همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است در طول موج‌های 311 ، 431 ، 516 ، 471 نانومتر رخ داده است (دو مورد انتهایی مربوط به C_2^* است) [۷]. همچنین طول موج 933 نانومتر مربوط به گونه‌ی اصلی احتراقی H_2O^* که فرآورده‌ی اصلی احتراق نیز تلقی می‌شود، می‌باشد [۸].

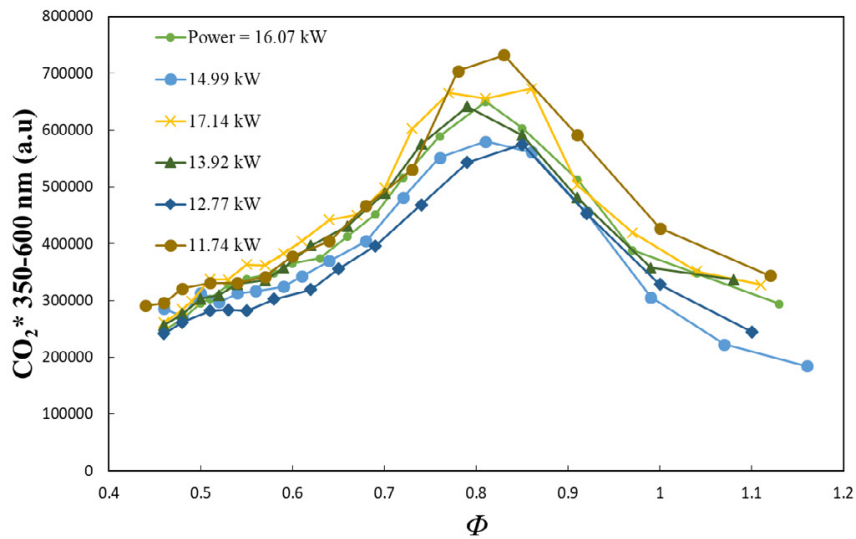
در شکل ۸ تغییرات شدت تابش گونه‌ی OH^* بر حسب نسبت هم‌ارزی در توان‌های مختلف مشعل رسم شده است. این محدوده از توان با توجه به منطقه‌ی پایداری شعله و با در نظر گرفتن محدوده‌های کاری رواترهای خط سوخت و هوا تعیین شده است. در این شکل در منطقه‌ای که شعله تابنده‌تر است، حرارت آزاد شده بیشتر بوده و شدت تابش OH^* نیز بیشتر است. بدین ترتیب، بالاتر بودن تولید رادیکال میانی OH^* مرتبط با احتراق کامل‌تر و با آزادسازی حرارت بیشتر است. گونه‌ی هیدروکسیل (OH^*) در تعیین نرخ حرارت آزاد شده نقش کلیدی دارد چرا که زنجیره‌ی واکنش‌های دما بالا را فعال می‌کند [۵] و به همین دلیل، در این بخش تحلیل شده است. همچنین

1 Chemiluminescent



شکل ۸. تغییرات شدت تابش مربوط به گونه OH^* بر حسب نسبت‌های مختلف هم‌ارزی و در ظرفیت‌های مختلف مشعل در کنار شکل واقعی شعله در چند نسبت هم‌ارزی (نسبت سوخت به هوا)

Fig. 8. OH^* intensity variation for different burner powers versus equivalence ratio

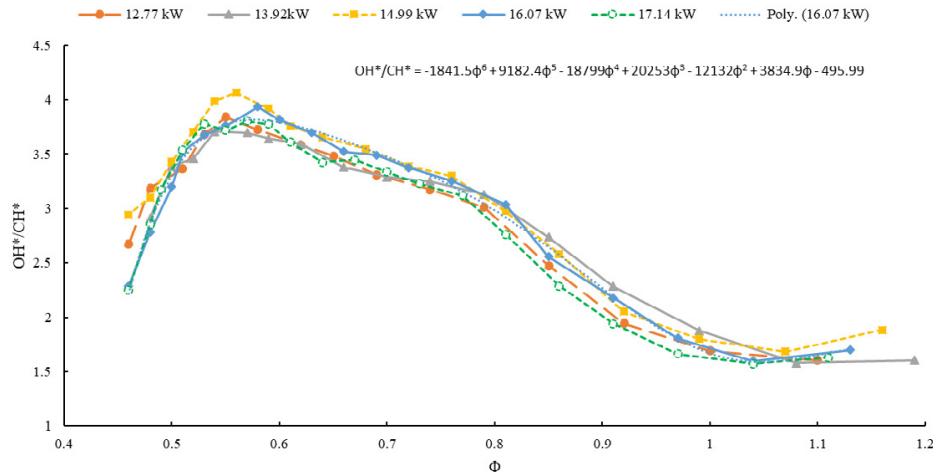


شکل ۹. تغییرات شدت تابش مربوط به گونه CO_2^* بر حسب نسبت‌های مختلف هم‌ارزی و در ظرفیت‌های مختلف مشعل

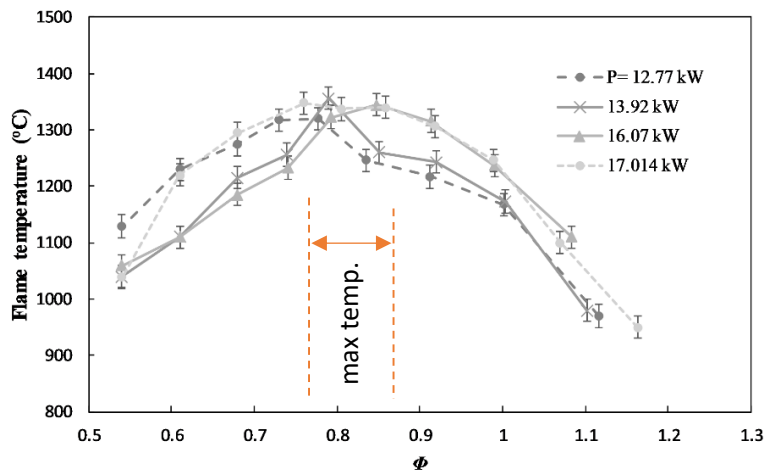
Fig. 9. CO_2^* intensity variation for different burner powers versus equivalence ratio

دو گونه‌ی OH^*/CH^* است که نمودار آن مطابق شکل ۱۰ به دست آمده است. همان طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود برای توان‌های

مربوط به بیشینه‌ی تابش OH^* دید. آخرین نتیجه در قسمت تشخیص گونه‌ها، مربوط به نسبت شدت



شکل ۱۰. نمودار تغییرات نسبت شدت OH^*/CH^* بر حسب نسبت هم‌ارزی در توان‌های مختلف مشعل
 Fig. 10. intensity ratio of OH^*/CH^* as a function of equivalence ratio



شکل ۱۱. تغییرات دمای اصلاح شده‌ی شعله بر حسب نسبت‌های مختلف هم‌ارزی و در ظرفیت‌های مختلف مشعل
 Fig. 11. Variation of flame corrected temperature versus different equivalent ratios in some powers

کلیدی داده‌های به دست آمده برای شدت تابش، با عدم قطعیت ۱۰٪ مقدار گزارش شده و دمای سطح سرمشعل دارای عدم قطعیت ۱۵°C است. همچنین کلیدی داده‌ها با سه بار تکرار آزمایش در شرایط یکسان به عنوان تکرار پذیری آزمایش انجام شده است. تحلیل عدم قطعیت داده‌های آزمایشگاهی به این صورت است که در هر آزمایش شدت طیف حاصله با فرکانس ۲۰ Hz ثبت شده و از داده‌های حاصله انحراف معیار مطابق رابطه‌ی (۱) به دست آمده است (که معادل عدم قطعیت در هر آزمایش است).

$$w = \sqrt{\frac{\sum(I - \bar{I})^2}{n}} \quad (1)$$

مختلف مشعل سوراخ‌دار روند کلی نمودار ثابت بوده و حداکثر خطای نسبی به دست آمده ۱۷٪ است. به این ترتیب می‌توان نسبت هم‌ارزی مشعل را تنها به کمک دریافت تابش طبیعی شعله‌ی آن به دست آورده و جهت تنظیم آن اقدام کرد.

در کارهای مشابه دیگر نیز روند غیر وابسته‌ی نسبت شدت گونه‌ها، به دبی مخلوط ورودی به مشعل (توان مشعل) در کاربردهای دیگر مورد مطالعه قرار گرفته است که مشابه آن را در مرجع [۱۲] می‌توان یافت. ارتباط یک به یک نسبت OH^*/CH^* با نسبت هم‌ارزی به ویژه در محدوده‌ی $0.78 < \Phi < 0.85$ در مورد این مشعل این امکان را فراهم می‌کند که بتوان از فاصله‌ی نیم متری نسبت هم‌ارزی آن را نیز اندازه گرفت.

• در کاربردهای صنعتی، استفاده از این روش در تعیین نسبت هم‌ارزی برای مشعل‌های کاربردی در صنایع مختلف در توان‌های کاری متفاوت آن‌ها و همچنین کاربرد این روش در تعیین محدوده‌ی عملکرد حرارتی مناسب مشعل‌های صنعتی، مورد توجه است. کار حاضر ابزاری را به منظور بررسی غیرتماسی ویژگی‌های عملکردی مشعل‌های مورد استفاده در دیگ‌های چگالشی مورد توجه قرار داده است در عین حال روش به کار گرفته شده قابل توسعه به سایر سامانه‌های احتراق صنعتی بوده و تعیین محدوده‌ی عملکرد حرارتی مناسب مشعل‌های صنعتی با آن به سادگی امکان‌پذیر است.

مراجع

- [1] J. Ballester and T. Garcia, Diagnostic Techniques for The Monitoring and Control of Practical Flames, Progress in Energy and Combustion Science, 36(2)(2010) 375–411.
- [2] A. Leipertz, S. Pfadler and R. Schießl, An Overview of Combustion Diagnostics Handbook of Combustion, New York: McGraw-Hill, (2010).
- [3] E. C. Rada, Thermochemical Waste Treatment by Combustion Gasification and Other Methodologies, New Jersey: Apple Academic Press, (2017).
- [4] C. E. Baukal, Industrial Combustion Testing, London: Taylor & Francis, (2010).
- [5] S. R. Turns and S. J. Mantel, An Introduction to Combustion, Second Edition, New York, McGraw Hill, (2000).
- [6] A. Labergue, J. D. Penacarillo, M. Gradeck and F. Lemoine, Combined Three-color LIF-PDA Measurements and Infrared Thermography Applied to The Study of The Spray Impingement on a Heated Surface Above the Leidenfrost Regime, International Journal of Heat Mass Transfer, 104(2)(2017) 1008–1021.
- [7] J. Ballester and T. Garcia-Armingol, Diagnostic Techniques for The Monitoring and Control of Practical Flames, Progress in Energy and Combustion Science, 36(4)(2010)375–411.
- [8] M. Ruão, M. Costa, and M. G. Carvalho, NOx Diagnostic System Based on a Spectral Ultraviolet/Visible Imaging Device, Fuel, 78 (1999) 1283–1292.

که در آن w عدم قطعیت در تابش بوده و I شدت به دست آمده از آزمایش و n تعداد داده‌های برداشت شده در هر آزمایش است.

شکل ۱۱ تغییرات دمای مشعل را برای توان‌های کاری و بر حسب نسبت هم‌ارزی نشان می‌دهد.

ملاحظه می‌شود که بیشینه دمای اندازه‌گیری شده از ترموکوپل نوع S ($0.87 < \Phi < 0.77$) به شکل مناسبی تأیید کننده‌ی محدوده‌ی بیشینه تابش در شکل‌های ۸ و ۹ (گونه‌های OH^* و CO_2^*) مربوط به مربوط به بیشینه نرخ حرارت آزاد شده از مشعل است که به به وسیله‌ی دمای اندازه‌گیری شده نیز تأیید شده است.

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله، طیف تابش طبیعی شعله در سرمشعل سوراخ‌دار به عنوان ابزاری برای تشخیص و اندازه‌گیری شعله به کار گرفته شد، به نحوی که روش به کار گرفته شده در خصوص ارزیابی عملکرد مشعل در نرخ حرارت آزاد شده کارایی ویژه‌ای داشته و می‌توان از روی نتیجه‌ی اخذ شده، محدوده‌ی مناسب نسبت هم‌ارزی را تعیین نمود. بر این اساس گونه‌های نورتاب مهم احتراقی در دستگاه مشعل سوراخ‌دار با احتراق پیش‌آمیخته، شناسایی شده و تابش آن‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. تغییرات شدت تابش گونه‌ی OH^* و CO_2^* در سرمشعل سوراخ‌دار برای نسبت‌های مختلف هم‌ارزی و ظرفیت‌های مختلف مشعل، به دست آمد که به عنوان شاخصی از نرخ حرارت آزاد شده مورد ارزیابی قرار گرفت. مهم‌ترین دستاوردهای این مقاله به شرح زیر است:

- نسبت هم‌ارزی بهینه برای تنظیم بیشترین نرخ حرارت آزاد شده از مشعل که مربوط به بالاترین میزان تابش OH^* و CO_2^* است، در محدوده‌ی مشترک $0.85 < \Phi < 0.78$ اتفاق افتاد.
- تغییرات نسبت شدت تابش OH^*/CH^* مشخص کننده‌ی رابطه‌ای مستقل از توان مشعل بوده و از روی آن می‌توان به نسبت هم‌ارزی مشعل پی برد. بدین ترتیب می‌توان مشعل را جهت بهبود مصرف سوخت تنظیم کرده بدون این که به آن نزدیک شویم.
- دمای شعله، اندازه‌گیری شده و پس از تصحیح مربوط به خطای ترموکوپل، بیشترین منطقه‌ی دمایی در محدوده‌ی $0.87 < \Phi < 0.78$ به دست آمد که در تطابق خوبی با نتایج مربوط به بیشینه حرارت آزاد شده مربوط به تابش گونه‌های OH^* و CO_2^* قرار دارد.

- [14] T. Parameswaran, R. Hughes, P. Gogolek, and P. Hughes, Gasification Temperature Measurement With Flame Emission Spectroscopy, *Fuel*, 134(3)(2014)579–587.
- [15] J. M. de Paulo, J. E. M. Barros and P. J. S. Barbeira, A PLS Regression Model Using Flame Spectroscopy Emission for Determination of Octane Numbers in Gasoline, *Fuel*, 176(1)(2016) 216–221.
- [16] J. Li, J. Zhao, S. Guo, X. Zhou, Y. Lio, J. Bai and Y. Fang, Predicting the Vanadium Speciation During Petroleum Coke Gasification by Thermodynamic Equilibrium Calculation, *Fuel*, 176 (2016) 48–55.
- [17] C. Romero, X. Li, S. Keyvan, and R. Rossow, Spectrometer-based Combustion Monitoring for Flame Stoichiometry and Temperature Control, *Applied Thermal Engineering*, 25(2)(2005) 659–676.
- [18] A. G. Gaydon, *The Spectroscopy of Flames*, Amsterdam: Springer, (1974)
- [19] S. Kadowaki and N. Ohkura, Time Series Analysis on The Emission of Light From Methane-Air Lean Premixed Flames, *Transactions of The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 51(4)(2008) 133-138.
- [9] J. J. Hernández, M. Lapuerta, and J. Barba, Flame Stability and OH and CH Radical Emissions From Mixtures of Natural Gas With Biomass Gasification Gas, *Applied Thermal Engineering*, 55(4)(2013)133–139.
- [10] J. M. Samaniego, F. N. Egolfopoluos and C. T. Bowman, CO₂ * Chemiluminescence in Premixed Flames, *Combustion Science and Technology*, 109(3)(1995)183–203.
- [11] J. Kojima, Y. Ikeda and T. Nakajima, Spatially Resolved Measurement of OH*, CH*, and C₂* Chemiluminescence in The Reaction Zone of Laminar Methane-Air Premixed Flames, *Journal of Combustion Institute*, 28 (2000)1757–1764.
- [12] Y. Hardalupas and M. Orain, Local Measurements of the Time-dependent Heat Release Rate and Equivalence Ratio Using Chemiluminescent Emission From a Flame, *Combustion and Flame*, 139(2004) 188–207.
- [13] C. S. Panoutsos, Y. Hardalupas and A. Taylor, Numerical Evaluation of Equivalence Ratio Measurement Using OH* and CH* Chemiluminescence in Premixed and non-Premixed Methane-air Flames, *Combustion and Flame*, 156 (2009)273–291.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Soltanian, M. Zabetian Targhi, H. Pasharshahi, *Experimental Investigation of Combustion Species Radiation to Evaluate Equivalence Ratio in a Surface Flame Burner*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(1) (2021) 41-52.

DOI: [10.22060/mej.2019.16162.6290](https://doi.org/10.22060/mej.2019.16162.6290)

